

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



بررسی تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک بر روی سایش ابزار برشی ماشین‌های EPB *

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.76503.1140

محمد داربر [۱]   حمید چاکری [۲]   طاها انصاری [۳]

چکیده *یکی از مهمترین مشکلات حفاری مکانیزه، سایش و خوردگی ابزار و قطعات حفاری می‌باشد. سایندگی خاک، باعث کاهش قابل توجه راندمان حفاری و افزایش هزینه‌های اجرایی تونل‌های شهری می‌شود. مطالعات گسترده‌ای در مورد سایش و خوردگی بر روی سنگ‌ها وجود دارد. با این حال، مطالعات محدودی روی ذرات خاک و تأثیر آنها بر ابزار برشی ماشین حفاری انجام شده است. با وجود طیف گسترده‌ای از روش‌ها و دستگاه‌های اندازه‌گیری سایش خاک، تاکنون روش استاندارد و جامعی برای اندازه‌گیری سایش خاک ارائه نشده است. در این پژوهش، به منظور تعیین سایش خاک، دستگاه آزمایشگاهی جدیدی ساخته شد و تأثیر توزیع اندازه ذرات و چگالی خاک بر روی سایش ابزار برشی در ۸ دانه‌بندی مختلف خاک بررسی شد. همچنین، با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک با حداکثر چگالی (نمودار تالبوت)، مقادیر سایش ابزارهای برشی در دانه‌بندی‌های مختلف مقایسه شد. نتایج نشان داد، بیشترین مقدار سایش ابزارهای برشی در خاک‌های با دانه‌بندی منطبق بر دانه‌بندی به دست آمده از معادله تالبوت اتفاق می‌افتد. به هر میزانی که نمودار دانه‌بندی خاک از نمودار تالبوت فاصله می‌گیرد، سایش‌ها کاهش می‌یابند. همچنین، حداکثر سایش ابزارهای برشی در مقدار ریزدانه ۱۰ درصد با درصد سایش میانگین ۲۷/۳ درصد، اتفاق می‌افتد. با کاهش ریزدانه به مقادیر پائین‌تر از ۱۰ درصد، ساختار خاک به‌هم‌خورده و در نتیجه درصد سایش میانگین ابزارهای برشی از ۲۷/۳ درصد در خاک با ریزدانه ۱۰ درصد به ۲/۳۷ درصد در خاک بدون ریزدانه کاهش پیدا می‌کند. همچنین، با افزایش چگالی خاک از ۱/٦ به ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، درصد سایش میانگین ابزارهای برشی از ۸/۱ درصد به ۳۱/٤ درصد افزایش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی حفاری مکانیزه، ابزار برشی، سایندگی، دانه‌بندی خاک، چگالی.

The Influence of Soil Particle Size Distribution on the Abrasion of EPB Machine Cutting Tools

Mohammad Darbor   Hamid Chakeri   Taha Ansari

Abstract *One of the most critical problems of mechanized tunnelling is the abrasion of cutting tools. Soil abrasivity significantly reduces drilling efficiency and increases the operating costs of urban tunnels. There are extensive studies on abrasivity of rocks. However, limited studies have been performed on the influence of soil particle size distribution on tunnelling machine cutting tools. Despite the wide range of methods and devices for measuring soil abrasivity, so far, no standard and comprehensive method for measuring soil abrasivity have been presented. In this study, considering the effect of some effective parameters on the abrasion of cutting tools, a new laboratory machine to determine soil abrasivity was constructed. Then, using 8 different types of soil granulation, the effect of soil particle size distribution and density on cutting tool abrasion was studied. Also, using the Talbot curve, the abrasion values of cutting tools in different particle sizes were compared. The results showed that the highest values of cutting tools abrasion occur in soils with particle sizes according to the Talbot equation. As the soil granulation curve moves away from the Talbot curve, abrasivity decreases. Also, the maximum abrasion of cutting tools occurs in the amount of fine aggregate of 10% with an average abrasion percentage of 27.3%. By reducing the fine aggregate to values lower than 10%, the soil structure is disturbed and as a result, the average abrasion percentage of cutting tools decreases from 27.3% in soil with 10% fine aggregate to 2.37% in soil without fine aggregate. Also, by increasing soil density from 1.6 to 1.8, the average abrasion percentage of cutting tools increases from 8.1% to 31.4%.*

Keywords Mechanized excavation, Cutting tools, Soil abrasivity, Particle size distribution, Density.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/۲/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۷/۲ می‌باشد

Email: darbor@sut.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

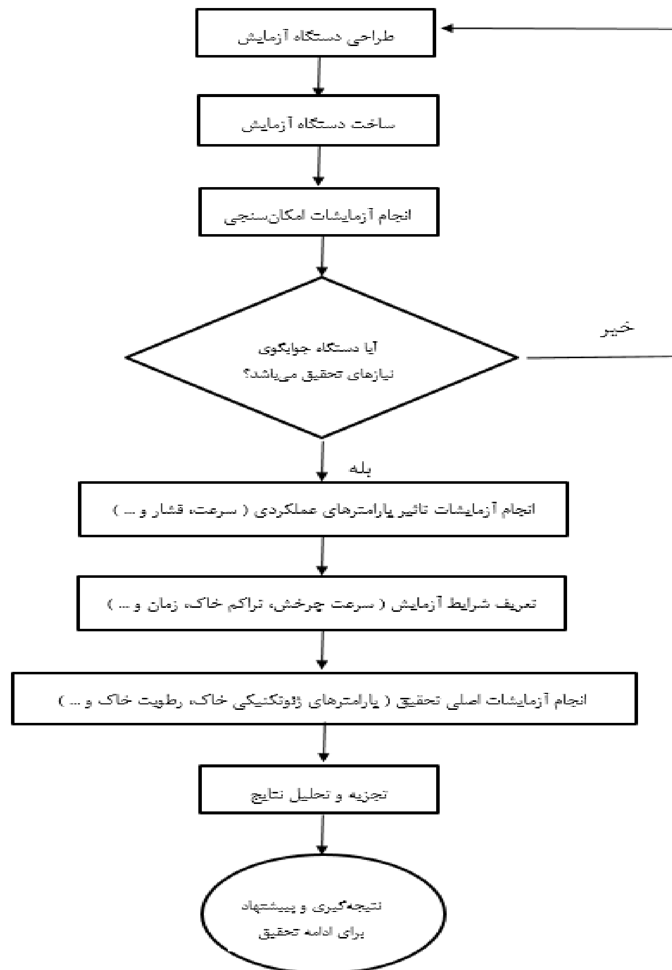
(۳) فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از دستگاه حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل (TBM) برای حفر فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری بنا به دلایلی مانند ایجاد اختلال کم در ترافیک شهری، سرعت بالا، سهولت و ایمنی بیشتر در عملیات اجرایی حفاری، افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است [1]. امروزه به کارگیری ماشین‌های حفاری تونل از نوع سپر تعادلی زمین به یک روش انحصاری تبدیل شده است [2]. عملکرد مؤثر دستگاه حفاری مکانیزه با توجه به محدودیت‌های اقتصادی در تونل‌سازی مکانیزه، اساساً توسط خاصیت سایندگی خاک و سایش قسمت‌های مختلف TBM تعیین می‌شود [3]. عوامل مؤثر بر سایندگی شامل عوامل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، خصوصیات ماشین حفاری و پارامترهای حفاری هستند [4-6]. یکی از مهمترین ویژگی‌های زمین‌شناسی مؤثر بر سایش ابزار برش، دانه‌بندی خاک است. مطالعات انجام شده، تأثیر اندازه ذرات خاک را در قابلیت سایندگی خاک نشان می‌دهد. تورو و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر اندازه ذرات خاک را در میزان سایندگی بررسی کردند. آنها ضریب سایش LCPC را در نمونه‌های مختلف خاک اندازه‌گیری کرده و نشان دادند که بین قطر ذرات خاک و ساییدگی رابطه مستقیم وجود دارد[7] . دراکر (۲۰۱۱) با استفاده از نتایج آزمایش LCPC، سایندگی شن‌های آبرفتی دانوب را مطالعه کرد. تحقیقات در مورد اندازه ذرات مختلف خاک نشان داد که یک رابطه خطی مستقیم بین اندازه ذرات خاک و سایندگی وجود دارد [8]. برای بررسی تأثیر اندازه ذرات در مطالعات سایشی خاک، می‌توان از پارامترهای دانه‌بندی استفاده کرد. تورو و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقات خود از D_{50} استفاده کردند، اندازه‌ای که ۵۰ درصد ذرات کوچکتر از آن هستند [4]. هاشم نژاد و همکاران (۲۰۱۲) از اندازه مؤثر (ES) برای مطالعه نمونه‌های ساینده استفاده کردند [9]. برزگری و همکاران (۲۰۱۵) آزمایش‌های سایش را روی مجموعه‌ای از خاک‌های سیلیسی با گروه‌های دامنه‌ای با قطر متفاوت انجام دادند. اندازه ذرات خاک مورد استفاده در این تحقیق بین ۰/۱ تا ٤ میلی‌متر می‌باشد. آنها نشان دادند، با افزایش اندازه ذرات خاک، میزان سایش افزایش می‌یابد. با این وجود، روند صعودی با بزرگتر شدن اندازه ذرات از ٤ میلی‌متر متوقف شد [3]. قهرمان و همکاران (۲۰۱٦) ارتباط بین ضریب سایشی LCPC و پارامترهای بافت خاک را بررسی کردند. آنها با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر، متوسط قطر ذرات خاک را تعیین و از آن در مطالعات خود در مورد سایندگی نمونه‌های خاک استفاده کردند [10]. با استفاده از دستگاه آزمایش RUB، کوپفرلی و همکاران (۲۰۱٦)، تأثیر اندازه ذرات خاک را بر میزان سایندگی خاک مطالعه کردند. این مطالعات، شامل آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف شن و ماسه کوارتزی با اندازه ذرات ۰/۰٦–۱ میلی‌متر ، ۰/۰٦–۲ میلی‌متر و ۰/۰٦–٤ میلی‌متر بود. با افزایش دامنه اندازه ذرات نمونه‌های آزمایش شده، سایش‌های ثبت شده در آزمایش‌ها افزایش یافت [11].

جاکوبسن و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از دستگاه سایش LCPC، تأثیر توزیع دانه‌بندی خاک را بر روی سایش در خاک غیرچسبنده مطالعه کردند. آنها از ترکیب دو نوع دانه‌بندی درشت‌دانه و ریزدانه سیلیسی، با درصدهای مختلف، برای توزیع دانه‌بندی نمونه‌های مورد آزمایش خود استفاده کردند. در این پژوهش، با افزایش اندازه مؤثر (ES)، مقادیر سایش، افزایش یافت [12]. لی و همکاران (۲۰۲۲)، تأثیر پارامترهای مختلف را بر روی سایش ابزارهای برشی بررسی کردند. آنها نشان دادند، با افزایش نسبت تزریق فوم (FIR)، مقدار سایش و نیز مقدار انرژی مورد نیاز برای حفاری کاهش می‌یابد [13]. چن و همکاران (۲۰۲۲)، به وسیله یک نمونه شبیه‌ساز آزمایشگاهی از دستگاه حفاری مکانیزه، عوامل مؤثر بر کاهش سایش را بررسی کردند. آنها نشان دادند با افزایش نسبت تزریق فوم (FIR)، سرعت حفاری افزایش می‌یابد [14].

مطالعات ذکر شده، بیشتر بر روی تأثیر اندازه ذرات، مخصوصاً درشت‌دانه‌ها در غیاب ذرات سیلت و رس متمرکز شده‌اند و عملاً بخش وسیعی از ذرات خاک را در نظر نگرفته و تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک طبیعی را بررسی نکرده‌اند. همچنین بیشتر مطالعات انجام شده به گونه‌ای است که ابزار برشی همواره با خاک دست‌خورده در تماس است. در این پژوهش، برای حل این مشکلات، دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک با قابلیت استفاده در خاک‌هایی با حداکثر اندازه ذرات ۲۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شد. برای بررسی تأثیر توزیع اندازه ذرات و چگالی خاک بر روی سایش ابزار برشی، ۸ نوع دانه‌بندی خاک، انتخاب شده و در مجموع، ۲٤ آزمایش مختلف انجام شده است. همچنین، با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک با حداکثر چگالی (نمودار تالبوت)، مقادیر سایش ابزارهای برشی در دانه‌بندی‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. شکل (۱) روند نمای مراحل مختلف این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱ مراحل تحقیق

جدول ۱ پارامترهای مؤثر بر سایش خاک در حفاری مکانیزه تونل [17]

پارامترهای مؤثر بر سایش خاک	
پارامترهای حفاری	سرعت چرخش کله‌حفار، میزان نفوذ، گشتاور کله‌حفار، فشار اطاقک حفاری، نیروی فشاری، نوع افزودنی‌ها، شرایط اصلاح خاک و...
مشخصات فنی دستگاه حفاری	نوع دستگاه حفاری، چیدمان ابزار برشی، قطر دستگاه، میزان بازشدگی کله‌حفار، تعداد ابزار برشی، جنس و سختی ابزار و...
ویژگی‌های زمین‌شناسی	دانه‌بندی خاک، بافت خاک، کانی‌شناسی، دانسیته خاک، شکل دانه‌ها، جنس خاک، تراکم، درصد رطوبت، زاویه‌داری و...

تأثیر سایندگی خاک بر حفاری مکانیزه

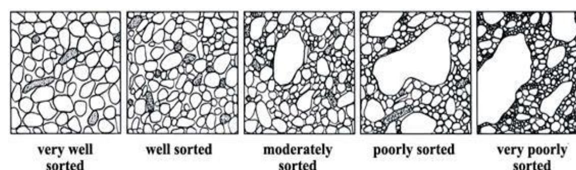
پدیده سایش در حفاری مکانیزه تونل‌ها از دو نوع سایش اولیه یا سایش حفاری و سایش ثانویه تشکیل می‌شود. در نوع اول، که به عنوان سایش اولیه یا سایش حفاری شناخته می‌شود، ابزارهای برش به دلیل درگیری مستقیم با خاک، ساییده می‌شوند. از بخش-هایی از دستگاه حفاری که مورد سایش اولیه قرار می‌گیرند، می-توان به دیسک‌ها، باکت‌ها و اسکرپرهای دستگاه حفاری اشاره نمود. برای این نوع سایش، عامل تعیین کننده میزان سایش، نیروی تماسی بین ابزارهای برش و دانه‌های خاک موجود در جبهه‌کار تونل است. نوع دوم که به سایش ثانویه معروف است، شامل سایش نگهدارنده‌های ابزارهای برشی و قطعاتی که به صورت غیرمستقیم با زمین درگیر هستند، می‌شود [15,16]. در جدول (۱) تقسیم‌بندی عوامل مؤثر بر سایش خاک در حفاری مکانیزه، بیان شده است.

در هر توده خاک، اندازه متنوعی از ذرات خاک موجود است. برای طبقه‌بندی مشخصات خاک، باید توزیع دانه‌بندی خاک معلوم باشد. منحنی دانه‌بندی خاک‌های درشت‌دانه را می‌توان با استفاده از آزمایش دانه‌بندی خشک با سری الک‌ها انجام داد. پارامترهای مهم منحنی دانه‌بندی خاک عبارتند از [18]:

- اندازه مؤثر (D_{10}): این پارامتر گویای قطر متناظری از نمودار دانه‌بندی خاک می‌باشد که ۱۰ درصد ذرات خاک مورد نظر از آن قطر کوچکترند.
- ضریب یکنواختی (C_u): نسبت D_{60} به D_{10} را ضریب یکنواختی گویند.
- ضریب دانه‌بندی یا انحنا (C_c): این فاکتور از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_c = \frac{{D_{30}}^2}{D_{10} \times D_{60}} \qquad (۱)$$

D_{30} و D_{60} قطرهای مربوط به ذراتی هستند که به ترتیب ۳۰ و ۶۰ درصد ذرات از آنها ریزترند.



شکل ۲ انواع جورشدگی در خاک

- جورشدگی: این پارامتر دانه‌بندی خاک، نشان‌دهنده میزان یکنواختی ذرات خاک از نظر شکل و اندازه می‌باشد (شکل ۲). جورشدگی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_0 = \sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}} \qquad (۲)$$

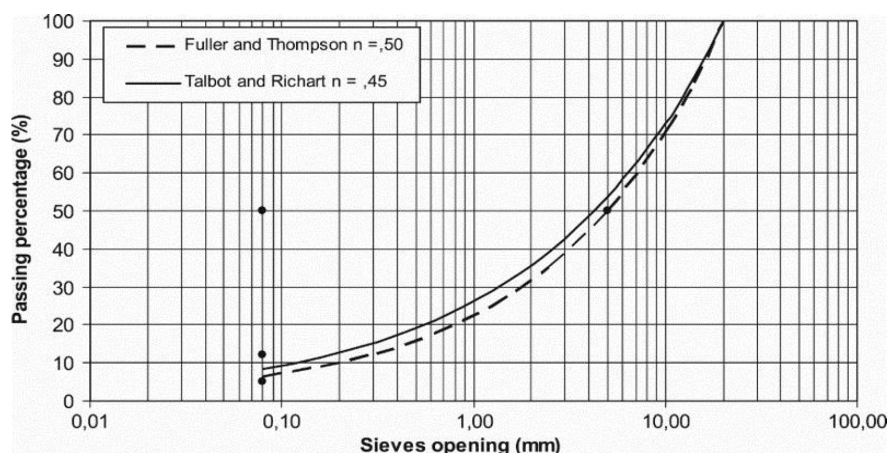
در این رابطه، S_0: جورشدگی، D_{75}: قطر متناظر با ۷۵ درصد عبوری ذرات و D_{25}: قطر متناظر با ۲۵ درصد عبوری ذرات خاک می‌باشد.

- اندازه مؤثر (ES): اندازه مؤثر از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$Eff\ size = 0.1\left(\frac{d_{min}+D_{10}}{2}\right) + 0.2\left(\frac{D_{10}+D_{30}}{2}\right) + 0.3\left(\frac{D_{30}+D_{60}}{2}\right) + 0.4\left(\frac{D_{60}+d_{max}}{2}\right) \qquad (۳)$$

که d_{min} و d_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر قطر ذرات ساینده هستند. یکای همه پارامترها بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

- منحنی دانه‌بندی خاک با حداکثر چگالی: منحنی حداکثر چگالی دانه‌بندی خاک برای اولین بار در بتن‌سازی به منظور به حداقل رساندن حفرات و فضاهای خالی در داخل ساختار خاک و صرفه‌جویی در مصرف سیمان مورد توجه قرار گرفت. فولر و تامپسون (۱۹۰۷)، معادله (٤) را برای تعیین حداکثر چگالی ارائه کردند [19]. بعدها توسط تالبوت و ریچارت (۱۹۲۳) نشان داده شد که معادله فولر و تامپسون، حداکثر چگالی را به دست نمی‌دهد. از این رو، تالبوت و ریچارت به جای توان ۰/۵ در معادله فولر و تامپسون، از یک فرم عمومی n استفاده کرده و معادله (۵) را ارائه کردند [20]. حداکثر چگالی در معادله تالبوت و ریچارت در $n = 0.45$، یک منحنی دانه‌بندی با حداقل ریزدانه را به دست می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۳ دانه‌بندی خاک دارای حداکثر چگالی [21]

$$P_d = \left(\frac{d}{D_{MAX}}\right)^{0.5} \times 100 \quad (٤)$$

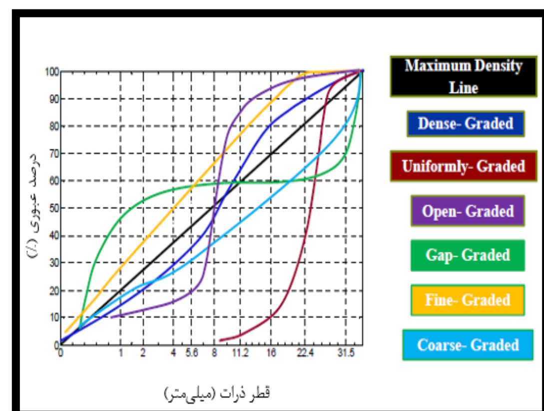
$$P_d = \left(\frac{d}{D_{MAX}}\right)^{n} \times 100 \quad (٥)$$

در روابط بالا، d قطرالک موردنظر، D_{MAX}: حداکثر قطر ذرات نمونه خاک، P_d: درصد عبوری از الک d و n ضریب تالبوت است.

در جدول (۲) نحوه دانه‌بندی خاک با فرمول تالبوت با $n = 0.45$ تشریح شده است. همچنین در شکل (٤) انواع دانه‌بندی خاک، طبق معادله تالبوت بیان شده است.

جدول ۲ دانه‌بندی خاک با معادله تالبوت برای رسیدن به حداکثر چگالی

شماره الک (میلیمتر)	درصد عبوری (٪)
۱۹	$p = \left(19/19\right)^{0.45} \times 100 = 100$
۱۲/۵	$p = \left(12.5/19\right)^{0.45} \times 100 = 83.3$
۹/۵	$p = \left(9.5/19\right)^{0.45} \times 100 = 73.2$
۲	$p = \left(2/19\right)^{0.45} \times 100 = 36.3$
۰/۳	$p = \left(0.3/19\right)^{0.45} \times 100 = 15.4$
۰/۰۷۵	$p = \left(0.075/19\right)^{0.45} \times 100 = 8.2$



شکل ٤ انواع دانه‌بندی خاک‌ها

آزمون‌های ارزیابی ساینیدگی در خاک

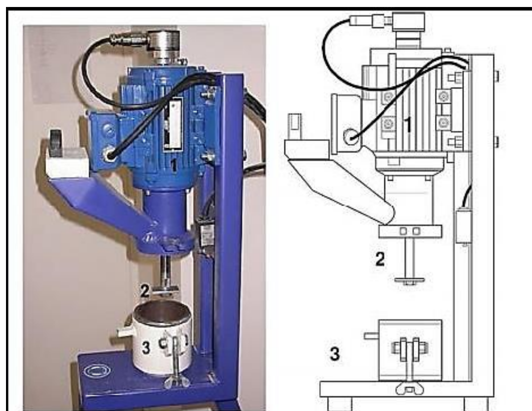
گستردگی عوامل مؤثر بر ساینیدگی، نیاز به انجام آزمایش‌های مختلف برای اندازه‌گیری دقیق میزان ساینیدگی را نشان می‌دهد. آزمون‌های محتوای کوارتز معادل، لس آنجلس، سایش دوری، میل بال نوردیک، NTNU (SAT)، LCPC، PSA و SGAT از جمله روش‌های ارزیابی ساینیدگی در خاک هستند.

آزمایش LCPC

آزمایش LCPC در دهه ۱۹۸۰ توسط مرکزی به همین نام در فرانسه ارائه شد. روش انجام این آزمایش در استاندارد فرانسوی AFNOR P18-579 (1990) آمده است [22]. دستگاه LCPC (شکل ۵)، یک موتور با توان ۷۵۰ وات دارد که بر روی شفت آن یک پروانه فولادی سوار است. جنس پروانه یا همان ابزار برش از فولاد آلیاژی با سختی ۶۰-۷۵ راکول بوده و ابعاد آن ۵×۲۵×۵۰ میلی‌متر می‌باشد. این پروانه در داخل یک مخزن استوانه‌ای که حاوی نمونه آزمایشی است، قرار می‌گیرد [10]. در این آزمایش، از ۵۰۰ گرم نمونه خشک شده در هوا با ابعاد ٤ الی ٦/۳ میلی‌متر استفاده می شود. داخل ظرف استوانه‌ای حاوی نمونه، پروانه فولادی به مدت پنج دقیقه با سرعت ٤۵۰۰ دور بر دقیقه می‌چرخد. برای به دست آوردن میزان ساینیدگی نمونه، جرم تیغه، قبل و بعد از آزمون، اندازه‌گیری می‌شود. ضریب سایشی (LAC) از رابطه (٦) به دست می‌آید [7]:

$$LAC = \frac{m_0 - m}{M} \quad (٦)$$

در رابطه (٦) m_0: جرم ابتدایی پروانه، m: جرم ثانویه پروانه بعد انجام آزمایش و M: جرم نمونه می‌باشد. ضریب LAC اغلب بر حسب گرم بر تن محاسبه می‌شود.



شکل ۵ دستگاه آزمون ساینیدگی LCPC، ۱) موتور الکتریکی، ۲) پروانه فولادی، ۳) مخزن استوانه‌ای [7]

رده‌بندی قابلیت ساینیدگی ابزار با نمونه خاک و سنگ بر اساس مقادیر LAC در جدول (۳) تشریح شده است [23]. مزیت این آزمایش، ارزان بودن و سریع بودن آن است در حالی که دارای محدودیت‌هایی می‌باشد از جمله عدم امکان بررسی تأثیر تراست دستگاه، بازه دانه‌بندی بسیار محدود، سرعت بسیار زیاد تیغه در این آزمایش که اثر ضربه را نسبت به واقعیت، بزرگ‌نمایی می‌کند.

جدول ۳ رده‌بندی سایندگی خاک و سنگ بر اساس مقادیر LAC [۲۳]

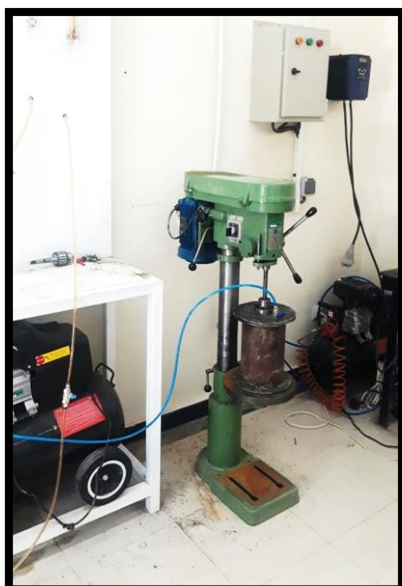
خاک	سنگ نمونه یا ترکیب خاک	پتانسیل سایش ابزار	توصیف سایندگی	مقدار LAC (gr/ton)
رس سیلتی و سیلت رس دار، ماسه کربناتی	چوب، زغال	خیلی کم	غیرساینده	۰ – ۵۰
	سیلتستون، گلسنگ، مارن	کم	خیلی کم	۵۰ –۱۰۰
شن غنی از کربنات	اسلیت، ماسه‌سنگ ریزدانه با میان لایه‌های رس، ولومیت، مرمر	متوسط	کم	۱۰۰ – ۲۵۰
ماسه غنی از کوارتز، شن غنی از کریستال و کوارتز، خاک‌های دانه‌ریز دارای کوارتز	سنگ آهک ماسه‌دار و ماسه‌سنگ، فیلیت و شیست (کم کوارتز)	بالا	متوسط	۲۵۰ – ۵۰۰
	ماسه‌سنگ کوارتزی، آندزیت، بازالت، میکا شیست، آمفیبولیت سست	خیلی بالا	بالا	۵۰۰ – ۱۲۵۰
دارای کوارتز یا شن کریستالی، سنگ ریزه	کوارتز رگه‌ای، کوارتزیت، گرانیت، دیوریت، سینیت، گنیس، اکلوژیت، آمفیبولیت	بی‌نهایت بالا	خیلی بالا	۱۲۵۰ – ۲۰۰۰

دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک به منظور شباهت هر چه بیشتر شرایط آزمایشگاهی با شرایط واقعی و مکانیزم ماشین حفاری تونل، طراحی و ساخته شده است. از موارد کاربرد این دستگاه می‌توان به ارزیابی و بررسی میزان سایندگی نمونه‌های خاکی و سایش ابزارهای برش، اشاره نمود. از مزایای و ویژگی‌های انحصاری این دستگاه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- دارای صفحه حفاری شبیه کله‌حفار TBM با آرایش ابزار برش‌های مرکزی، میانی و محیطی.
- نفوذ مداوم کله‌حفار و در نتیجه نفوذ ابزارهای برش به داخل خاک تازه و دست نخورده.
- قابلیت تنظیم سرعت چرخش صفحه حفار.
- امکان تنظیم سرعت نفوذ کله حفار در خاک.
- امکان تنظیم فشار پشت صفحه حفار توسط ورودی هوای فشرده.

اجزای مختلف دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک، شامل اینورتور، موتور، شفت و کلّه‌حفار، محفظه حفاری و کمپرسور هوا است (شکل ٦). در ادامه بخش‌های مختلف دستگاه تشریح می‌شود.



شکل ٦ نمای کلی دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک



شکل ۷ دستگاه تنظیم سرعت چرخش کله‌حفار (اینورتر)

۱- اینورتر. به منظور تنظیم سرعت چرخش کله‌حفار درون مخزن، از یک دستگاه تنظیم سرعت چرخش کله‌حفار استفاده شده است. این دستگاه قابلیت تنظیم سرعت کله‌حفار از ۱۰ دور در دقیقه تا ۵۰۰ دور دقیقه را دارد (شکل ۷).

۲- کمپر سور هوا. برای تأمین هوای فشرده و بالا بردن فشار داخل محفظه حفاری دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک، از یک کمپرسور هوا، ساخت شرکت استرانگ و به حجم ۲٤ لیتر استفاده شده است (شکل ۸).

۳- *موتور.* دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک، شامل یک موتور، ساخت شرکت موتوژن با توان ۱/۵ کیلو وات بر روی پایه دریل ستونی ساخت ماشین‌سازی اردبیل، به منظور تأمین نیروی لازم جهت چرخش و نفوذ کله‌حفار به داخل نمونه خاک در درون محفظه فولادی می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۸ کمپرسور هوای دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک



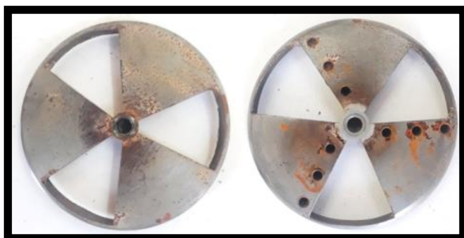
شکل ۹ موتور دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

۴- *شفت و کلّه‌حفار.* جهت انتقال قدرت از سیستم تولید قدرت (موتور) به کلّه‌حفار از یک شفت به قطر ۱/۵ سانتی‌متر و طول ۲۷ سانتی‌متر، از جنس فولاد استفاده شده است. این شفت از سه قسمت دنباله گوه‌ای شکل جهت جایگیری در داخل دریل، بخش میانی با مقطع دایره‌ای ساده جهت لغزیدن داخل فلنجک و قسمت پیچی انتهایی جهت قرار گرفتن در کله‌حفار، تشکیل شده است (شکل ۱۰).

جهت حفاری داخل نمونه خاکی و همچنین تأمین فشار موردنیاز جهت متراکم نگه داشتن خاک، از یک کله‌حفار از جنس استیل با سختی بالا استفاده شده است. کله‌حفار دارای مقطع دایره‌ای به شعاع ٦ سانتی‌متر و به ضخامت ۱/۳ سانتی‌متر می‌باشد. کله‌حفار دارای سه ردیف (سه پروانه) سه سوراخه برای نصب ابزار برش (پین) است. نزدیک‌ترین سوراخ‌ها از مرکز کله‌حفار برای نصب ابزار برشی مرکزی، سوراخ‌های میانی برای نصب ابزار برشی میانی و سوراخ‌های کناری برای نصب ابزارهای برش محیطی استفاده می‌گردد. فاصله سوراخ‌ها از هم ۱/۵ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین، کله‌حفار دارای ٤٥ درصد بازشدگی برای هدایت خاک حفاری شده به پشت کله‌حفار است (شکل ۱۱).



شکل۱۰ شفت دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک



شکل ۱۱ کله‌حفار دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک
سمت راست: نمای جلو همراه با سوراخ‌های محل نصب پین،
سمت چپ: نمای عقب

۵- *محفظه حفاری.* محفظه حفاری دستگاه از جنس فولاد به ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شده است. برای تحمل فشارهای بالا، ضخامت محفظه، زیاد انتخاب شده است. محفظه دارای ابعادی به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و به شعاع ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۱۲).

درپوش محفظه در قسمت بالای محفظه، توسط پیچ‌ها به بدنه محفظه متصل می‌شود. همچنین یک شیار بر روی درپوش در محل اتصال به بدنه طراحی شده است تا با جایگیری درزگیر در آن شیار، محفظه ایزوله گشته و از نشت هوای پرفشار تزریقی

به بیرون جلوگیری گردد. در مرکز درپوش، سوراخی، جهت عبور شفت از محل اتصال به دریل تا محل اتصال به کله‌حفار درون محفظه، طراحی شده است. در محل سوراخ یک فلنجک فولادی قرار داده شده است که داخل آن یک بوش از جنس برنجی تعبیه شده است. این فلنجک، هم به عنوان تکیه‌گاه برای شفت بوده و هم اجازه حرکت بالا و پایین را به شفت می‌دهد. بر روی درپوش، یک شیر ورودی هوای فشرده جهت تزریق هوای پرفشار توسط کمپرسور قرار گرفته است (شکل ۱۳).

ابزارهای برشـــی اســـتفاده شـــده بر روی کله‌حفار در این پژوهش، ابتدا مفتول‌های ۳ متری بوده که برش داده شـــده و به قطعات با طول ۲ سانتی‌متری تبدیل شده و در نهایت با دستگاه رزوه ساز به پیچ تبدیل گشته و بر روی سوراخ‌های کله حفار بسته شدند (شکل ۱٤).



شکل ۱۲ محفظه حفاری دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک



شکل ۱۳ نمای درپوش محفظه دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک



شکل ١٤ ابزارهای برشی مورد استفاده در دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

خاک موردنیاز جهت استفاده در آزمایش‌ها از غرب شهر تبریز، از محل گودبرداری ایستگاه پنج خط دوم متروی تبریز تأمین شده است. خط دوم متروی تبریز به طول حدود ۲۲/٤ کیلومتر، در حال حاضر طولانی‌ترین مسیر از شبکه ریلی کلان‌شهر تبریز است. این خط، شامل ۲۰ ایستگاه است که از محدوده زمین‌های قراملک تبریز شروع شده و نهایتاً در میدان بسیج خاتمه می‌یابد. در طرح توسعهٔ این خط، گذر از منطقه خاوران و اتصال به ایستگاه راه‌آهن تبریز- میانه در نظر گرفته شده است (شکل ۱۵).



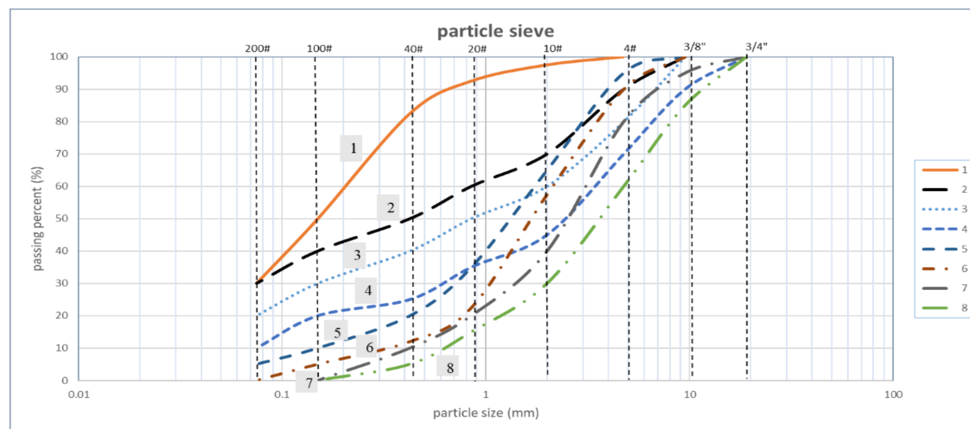
شکل ۱۵ نقشه مسیر خط ۲ متروی تبریز

با توجه به مطالعات اکتشافی و زمین‌شناسی انجام شده (تا عمق ۳۰ متری) در این ناحیه، رسوبات از نوع آبرفتی ریزدانه رسی و سیلتی می‌باشد. در میان این رسوبات آبرفتی ریزدانه، لایه‌های ماسه‌ای هم وجود دارد، ولی اغلب مسیر تونل از داخل رسوبات آبرفتی ریزدانه می‌گذرد. پژوهش‌های انجام شده بر روی میزان سایندگی نمونه سنگ‌های مسیر تونل متروی تبریز، نشان می‌دهد که مقدار اندیس سایش سرشار (CAI) برای این سنگ‌ها در حدود ۲/۳ الی ٤/۷ می‌باشد. بر اساس رده‌بندی انجام شده توسط پلینینگر و همکاران، سنگ‌های مسیر تونل، اغلب در گروه خیلی ساینده قرار دارند، همچنین مقدار کانی‌های ساینده (کوارتز) در این سنگ‌ها بین ٥ تا ۲۰ درصد می‌باشد.

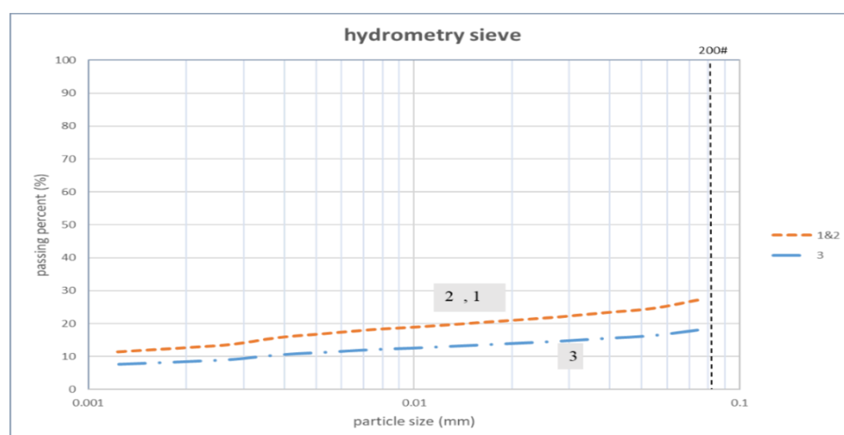
نمونه خاکی فراهم شده از محل مورد نظر، طبق استاندارد ASTM D 422-87 [24]، دانه‌بندی شد (شکل ١٦). دانه‌بندی بخش درشت‌دانه خاک به روش خشک با استفاده از سری الک-های استاندارد و دستگاه شیکر و دانه‌بندی بخش ریزدانه خاک با استفاده از روش هیدرومتری انجام شد. برای نشان دادن تأثیر نوع دانه‌بندی خاک بر مقدار سایش ابزارهای برش، ۸ نوع دانه‌بندی خاک انتخاب شد که در شکل (۱۷) نمودار بخش درشت دانه خاک‌ها و در شکل (۱۸) نمودار بخش ریزدانه خاک‌ها برای خاک‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده است.



شکل ١٦ دانه‌بندی نمونه تهیه شده از محل مورد نظر



شکل ۱۷ نمودار دانه‌بندی بخش درشت‌دانه نمونه‌های انتخاب شده برای انجام آزمایش سایش



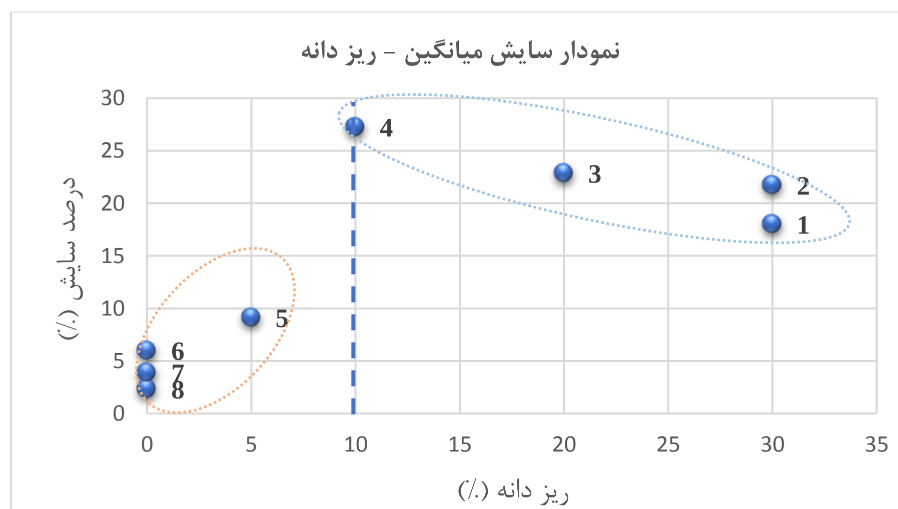
شکل ۱۸ نمودار دانه‌بندی بخش ریزدانه نمونه‌های انتخاب شده برای انجام آزمایش سایش

انتخاب ۸ نوع دانه‌بندی خاص، با درصدهای مختلفی از ذرات ریز و درشت، برای بررسی تأثیر انواع خاک‌ها بر مقدار سایش ابزار برش می‌باشد. در خاک نوع ۱، ذرات ریزدانه ۳۰ درصد بوده و هدف از انتخاب این دانه‌بندی، به‌دست آوردن مقدار سایش ابزار در حضور حداکثری ریزدانه می‌باشد. اما به طور مثال در خاک نوع ۸ که درشت‌دانه‌ترین نوع خاک در این تحقیق است، ذرات ریزدانه حضور ندارند و هدف، بررسی سایش در خاک‌های صرفاً درشت‌دانه بدون حضور ریزدانه است. برای بررسی تأثیر هر کدام از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بر روی سایش ابزار برشی، مقادیر D_{10}، CU، CC، مقدار ریزدانه و درشت‌دانه، جورشدگی و ES تعیین شدند (جدول ٤).

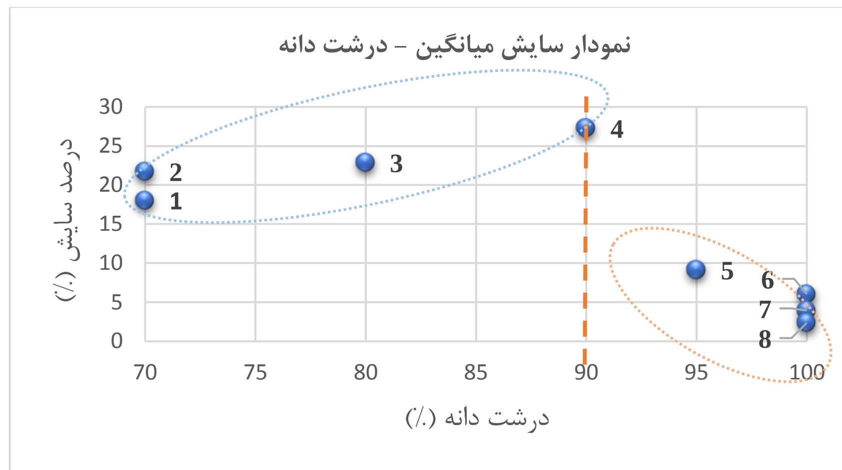
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای دانه‌بندی خاک بر روی میزان سایش ابزارهای برشی، آزمایش‌های سایش در ۸ دانه‌بندی مختلف خاک انجام شد و نمودارهای تغییرات میانگین درصدی سایش و همچنین میانگین وزنی سایش اتفاق افتاده روی ابزارهای برشی کله‌حفار بر حسب تغییرات هر کدام از پارامترها ترسیم شدند. در این آزمایش‌ها، مقدار رطوبت خاک‌ها، ۵ درصد، چگالی خاک مرطوب ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب، سرعت چرخش کله‌حفار ٦۰ دور در دقیقه، سرعت نفوذ کله‌حفار در خاک ۲/۵ میلی‌متر در دقیقه و زمان آزمایش ٤۰ دقیقه می‌باشد.

جدول ٤ مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی انواع دانه‌بندی‌های بررسی شده

خاک	شن (٪)	ماسه (٪)	سیلت و رس (٪)	D_{10} (mm)	ES (mm)	Cc	Cu	جورشدگی	USCS
۱	۰	۷۰	۳۰	۰/۰۰۱۲	۰/٦۹۱	۲۲/٦٥	۱۷۲/٥	۲/٤۱	SM
۲	۱۰	٦۰	۳۰	۰/۰۰۱۲	۱/٦۷٦	٥/٥۱	۷۰۸/۳	٦/٦	SM
۳	۲۰	٦۰	۲۰	۰/۰۰۳۸	۲/۱۸	۲/۹٦	٥۲٦/۳	٦/۲٤	SM
٤	۳۰	٦۰	۱۰	۰/۰۷٥	۳/۹٤	۱/٤۳۳	٤٤/۸	۳/٦۲	SW-SM
٥	٥	۹۰	٥	۰/۱٥	۲/٤۷٥	۱/۷۳	۱۱/٥۳	۲/۰۳	SW
٦	۱۰	۹۰	۰	۰/۳۱٦	۲/۹۳٤	۱/٥٤	٦/۷٦	۱/۸۸	SW
۷	۲۰	۸۰	۰	۰/٤۳	٥/۲۳٥	۱/۲۷٦	۷/۱٦	۱/٦۳	SW
۸	٤۰	٦۰	۰	۰/٦	٦/۰٤	۱/٤۰۳	۷/۹۲	۲/۰۳	SW



شکل ۱۹ تأثیر ریزدانه بر درصد سایش میانگین ابزارهای برشی



شکل ۲۰ تأثیر درشت‌دانه بر درصد سایش میانگین ابزارهای برشی

تأثیر مقدار ریزدانه و درشت‌دانه دانه‌بندی خاک بر سایش ابزار برش

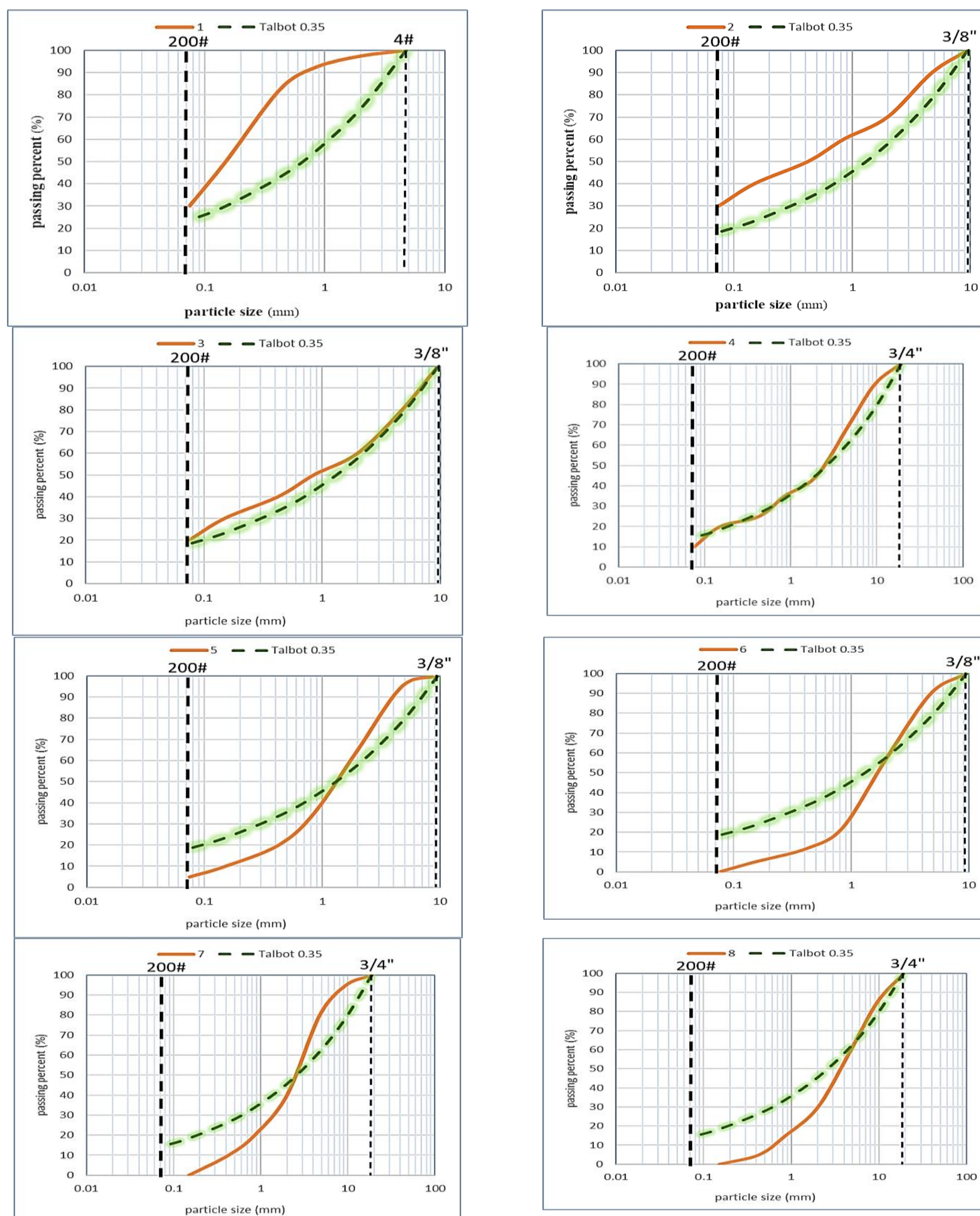
بررسی نمودارهای تأثیر ریزدانه بر میزان سایش ابزار برشی نشان می‌دهد که در نبود ریزدانه، مقدار سایش‌ها خیلی ناچیز و نزدیک صفر می‌باشد (شکل ۱۹). با افزایش اندک درصد ریزدانه در ترکیب خاک‌ها، مقدار سایش‌ها با شیب زیادی افزایش می‌یابد، طوری که در مقدار ریزدانه ۱۰ درصد به حداکثر سایش ابزارهای برشی می‌رسیم. بعد از این نقطه، با افزایش مقدار ریزدانه، مقدار سایش‌ها با شیب کم کاهش پیدا می‌کند. دلیل این نوع رفتار را این‌طور می‌توان بیان کرد که برای منسجم نگه داشتن ذرات درشت دانه یک نوع خاک در کنار هم، یک مقدار ریزدانه حداقلی لازم است تا این ذرات به راحتی در مقابل برخورد با ابزارهای برشی، قابلیت حرکت نداشته باشند. به عبارت دیگر این‌طور می‌توان بیان کرد که نقش ریزدانه در میزان سایش به صورت غیرمستقیم است.

با مشاهده نتایج مربوط به تأثیر دانه‌درشت‌ها بر میزان سایش میانگین می‌توان به این مهم دست یافت که با افزایش دانه‌درشت‌ها از ۷۰ درصد به ۹۰ درصد در ترکیب خاک، میزان سایش‌ها با شیب کم افزایش یافته است اما از درشت‌دانه ۹۰ درصد، کاهش شدید در میزان سایش‌ها مشاهده می‌گردد (شکل ۲۰). دلیل این رفتار را این‌گونه می‌توان بیان کرد که با افزایش درشت‌دانه‌ها در خاک، از ۷۰ درصد به ۹۰ درصد، از میزان ذرات ریزدانه با درجه سایندگی کم، کاسته شده و بر میزان ذرات درشت‌دانه با درجه سایندگی زیاد، افزوده می‌شود، در نتیجه سایش‌ها در حد کم افزایش می‌یابد. ولی از مقدار درشت‌دانه ۹۰ درصد به بعد، با افزایش درشت‌دانه‌ها، مقدار ریزدانه‌های لازم برای استحکام بخشیدن و یکپارچه ساختن ساختار خاک، کاسته می‌شود. در نتیجه ذرات درشت‌دانه با اعمال اندک نیرو توسط ابزارهای برشی، جابه‌جا شده و از ساختار خاک جدا می‌شوند و در نهایت بایستی شاهد کاهش چشمگیر سایش‌ها بود.

مقایسه مقادیر سایش ابزارهای برشی با استفاده از نمودار تالبوت

برای بررسی بیشتر نتایج به دست آمده، نمودارهای ۸ نوع دانه‌بندی خاک با نمودار دانه‌بندی تالبوت در $n = 0.35$ (دانه‌بندی خاک با حداکثر چگالی یا پکینگ)، مقایسه شد (شکل ۲۱). نتایج حاصل نشان می‌دهد، از دانه‌بندی ۱ تا ٤، در قسمت بالای نمودار تالبوت، با نزدیک شدن نمودار دانه‌بندی خاک به نمودار حداکثر چگالی، مقدار سایش میانگین با شیب کم، افزایش می‌یابد. علت این موضوع آن است که با نزدیک شدن به چگال‌ترین حالت دانه‌بندی خاک، تمامی فضاهای خالی بین ذرات درشت‌تر، توسط ذرات ریزتر، رفته رفته به‌طور کامل پرشده و پوشش داده می‌شود و در نتیجه ذرات در هم گیر کرده و ذرات درشت ساینده در هنگام برخورد با ابزار برش، حداکثر مقاومت را در برابر حرکت و جدا شدن از ساختار اصلی خاک، از خود نشان می‌دهند و باعث افزایش سایش‌ها می‌شوند. لازم به ذکر است که در طی این روند به تدریج از مقدار ریزدانه کاسته شده و بر میزان درشت‌دانه افزوده می‌شود. این روند تا میزان ریزدانه ۱۰ درصد در ترکیب خاک ادامه دارد. از دانه‌بندی ٤ به بعد، نمودارهای دانه‌بندی به سمت پایین نمودار حداکثر چگالی حرکت کرده و در واقع رفته رفته ذرات ریزدانه‌ای که در میان ذرات درشت‌تر قرار گرفته و فضای بین آنها را به طور پیوسته پر می‌کردند، حذف

شده و جای خود را به ذرات درشت‌دانه می‌دهند که هم قطرشان افزایش یافته و هم مقدارشان زیاد شده است. در نتیجه، فضاهای بین ذرات، خالی مانده و این فضاهای خالی رفته رفته افزایش یافته و در نهایت خاکی با ساختار شل به دست خواهد آمد. در این شرایط با کوچک‌ترین اعمال نیرو از طرف ابزار برشی به دانه‌درشت‌ها یا ذرات ساینده، ساختار خاک از هم پاشیده و ذرات به راحتی از هم جدا می‌شوند، به طوری که سایش ابزارهای برشی به شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱ نمودار دانه‌بندی خاک‌های ۱ تا ۸ در مقایسه با نمودار تالبوت

با ا ستفاده از نمودار دانه‌بندی خاک ۵ و نمودار شکل (۱۹) می‌توان به این نکته پی برد که در صد ریزدانه تقریباً ۱۰ در صد، یک نقطه بحرانی برای ترکیب هر خاک می‌با شد. یعنی با کاهش مقدار ریزدانه از این نقطه به بعد، ساختار خاک، متزلزل و شل شده و در نتیجه سایش‌ها به شدت کاهش پیدا می‌کند. همچنین توجه به این نکته نیز مهم است که با افزایش مقدار ریزدانه از ۱۰ درصد به بالا، مقدار سایش‌ها، با شیب خیلی کم کاهش می‌یابد.

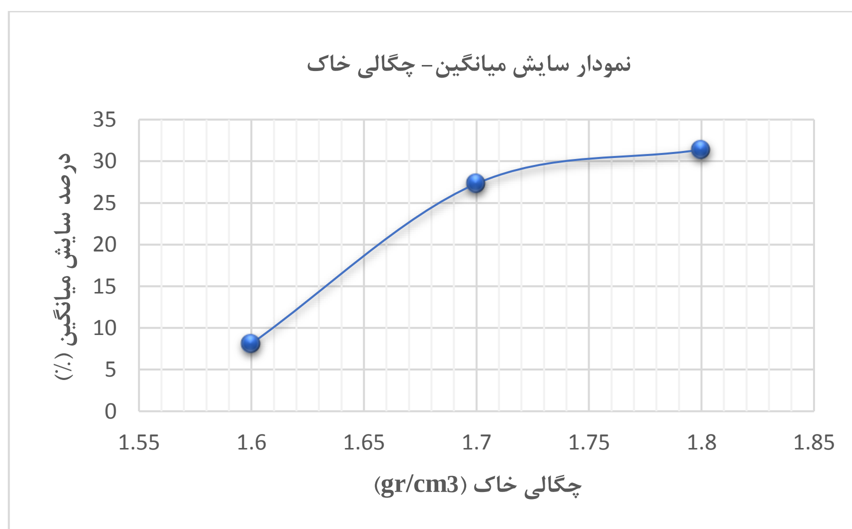
مقایسه میزان سایش ابزارهای برشی با نمودار دانه‌بندی تالبوت نشان می‌دهد که حداکثر سایش‌ها در حالت دانه‌بندی منطبق بر نمودار تالبوت اتفاق می‌افتد. همچنین در نمودار دانه‌بندی‌هایی که موازی با این دانه‌بندی و در سمت بالای نمودار قرار دارند به ترتیب از نزدیک به دور، سایش‌ها با شیب کم کاهش می‌یابند. اما اگر نمودار دانه‌بندی، یا به‌طور کامل یا بخ شی، در زیر نمودار تالبوت قرار گیرد، در این صورت مقدار سایش‌ها به شدت و با شیب زیاد کاهش می‌یابد. این روند در نمودار خاک‌های ۵ تا ۸ مشاهده می‌شود.

تأثیر چگالی خاک بر مقدار سایش ابزارهای برشی

برای برر سی تأثیر چگالی خاک بر سایش ابزارهای برش، خاک نوع ٤، انتخاب شد و آزمایش‌هایی با چگالی ۱/٦، ۱/۷و ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، طراحی و انجام شد. شرایط این سری آزمایش‌ها شامل سرعت متوسط چرخش کله‌حفار ٦۰ دور بر دقیقه، سرعت متوسط نفوذ کله‌حفار ۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه، زمان انجام آزمایش ٤۰ دقیقه و رطوبت خاک ۵ درصد می‌باشد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده نشان داد که با افزایش چگالی خاک، میزان سایش ابزارهای برشی افزایش می‌یابد (جدول ۵ و شکل ۲۲).

جدول ۵ تأثیر چگالی خاک بر مقدار سایش ابزارهای برشی

چگالی خاک ($\frac{gr}{cm^3}$)	نوع ابزار	وزن اولیه (gr)	وزن ثانویه (gr)	وزن اتلافی (gr)	سایش (٪)
۱/٦	مرکزی	۱/۳۲۰	۱/۳۱۸	۰/۰۰۲	۰/۱۵
	میانی	۱/٤۳٤	۱/٤۲۹	۰/۰۰۵	۰/۳۵
	محیطی	۱/۳۵	۱/۲۹۲	۰/۰۵	٤/۳
۱/۷	مرکزی	۱/۳۵۱	۱/۳۱۱	۰/۰٤	۲/۹٦
	میانی	۱/۳۹۹	۱/۲۳	۰/۱٦۹	۱۲
	محیطی	۱/٤۲	۰/٤٦۵	۰/۹۵۵	٦۷
۱/۸	مرکزی	۱/۳۱۸	۱/۲٦۳	۰/۰۵۵	٤/۲
	میانی	۱/٤۲۹	۱/۲	۰/۲۲۹	۱٦
	محیطی	۱/۱۳۸	۰/۲۹٦	۱/۰٤۲	۷٤



شکل ۲۲ تأثیر چگالی خاک بر درصد سایش میانگین ابزارهای برشی

با افزایش میزان تراکم خاک و در نتیجه افزایش چگالی خاک، تخلخل نسبی خاک، کاهش یافته و ابزار برشی نصب شده بر روی کله‌حفار در طی یک دور چرخش با ذرات بیشتری از خاک برخورد نموده و در عمل باعث افزایش میانگین سایش در ابزارهای برشی می‌گردد. همچنین، با افزایش تراکم خاک، فضای بین ذرات خاک کاهش یافته و قابلیت تحرک ذرات محدود می‌شود و در نتیجه موجب افزایش درصد سایش ابزارهای برشی می‌گردد.

نتیجه‌گیری

با وجود طیف گسترده‌ای از روش‌ها و دستگاه‌های اندازه‌گیری سایش خاک، تاکنون روش استاندارد و جامعی برای اندازه‌گیری سایش خاک ارائه نشده است. بنابراین، به منظور بررسی تأثیر برخی از محدودیت‌ها و پارامترهای مؤثر، در این پژوهش، دستگاهی برای انجام آزمایش سایش خاک و بررسی تأثیر پارامترهای دانه‌بندی خاک بر ابزار برش ساخته شد. در این راستا، تأثیر مقدار ریزدانه و درشت دانه دانه‌بندی خاک بر سایش ابزار برش بررسی شد. همچنین، مقادیر سایش ابزارهای برشی در دانه‌بندی‌های مختلف خاک، با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک با حداکثر چگالی (نمودار تالبوت) با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد:

۱. در نبود ریزدانه، مقدار سایش‌ها ناچیز و نزدیک صفر می‌باشد. با افزایش اندک درصد ریزدانه در ترکیب خاک‌ها، مقدار سایش با شیب شدیدی افزایش می‌یابد، طوری که در مقدار ریزدانه ۱۰ درصد به حداکثر سایش ابزارهای برشی با مقدار ۲۷/۳ درصد می‌رسد. بعد از این نقطه با افزایش مقدار ریزدانه، مقدار سایش‌ها با شیب کم کاهش پیدا می‌کند.

۲. با افزایش دانه‌درشت‌ها از ۷۰ درصد به ۹۰ درصد در ترکیب خاک، میزان سایش‌ها با شیب کم از ۱۸/۰۶ درصد تا ۲۷/۳ درصد افزایش یافته است اما از درشت‌دانه ۹۰ درصد، کاهش شدید در میزان سایش‌ها مشاهده می‌گردد.

۳. بیشترین مقادیر سایش ابزارهای برشی در خاک‌های با دانه‌بندی منطبق بر دانه‌بندی به دست آمده از معادله تالبوت اتفاق می‌افتد. به هر میزان که نمودار دانه‌بندی خاک موردنظر از نمودار تالبوت فاصله می‌گیرد، سایش‌ها کاهش می‌یابند. خاک‌هایی که نمودار دانه‌بندی آنها نسبت به نمودار تالبوت دارای انحراف بوده و در قسمت بالای آن قرار دارند، سایش آنها با شیب کمتری، کاهش می‌یابد. ولی خاک‌هایی که نمودار دانه‌بندی آنها نسبت به نمودار تالبوت دارای انحراف بوده و در قسمت پایین آن قرار دارند، سایش آنها با شیب بیشتری، کاهش می‌یابد.

٤. با افزایش چگالی خاک از ۱/٦ تا ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، درصد سایش میانگین ابزار برشی از ۸/۱ درصد به ۳۱/٤ درصد افزایش می‌یابد. علت این موضوع آن است که با افزایش چگالی خاک، فضای بین ذرات در ساختار خاک کاهش می‌یابد و در هر بار چرخش، کله‌حفار به تعداد ذرات خاک بیشتری برخورد کرده و موجب افزایش میزان سایش می‌شود.

مراجع

[1] A. H. Rezaie Farie, and A. A. Ehterami, “Study of mechanized tunnel boring machines performance in urban areas,” *New Approaches in Civil Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 14-30, 2018.

[2] G. Barzegari, and A. Uromeihy, “Study of soil abrasivity impact on TBM tunnelling efficiency at the Tabriz metro L1,” *Journal of Mining Engineering*, vol. 10, no. 29, pp. 67-79, 2016, (In Persian).

[3] G. Barzegari, A. Uromeihy, and J. Zhao, “Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 48, pp. 43-57, 2015.

[4] K. Thuro, J. Singer, H. Käsling, and M. Bauer, “Soil abrasivity assessment using the LCPC testing device,” Felsbau, vol. 24, no. 6, pp. 37-45, 2006.

[5] K. Thuro, and R. Plinninger, “Hard Rock Tunnel Boring, Cutting, Drilling and Blasting: Rock Parameters For Excavatability,” In 10th ISRM Congress, (2003).

[6] R. J. Plinninger, “Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein,” 2002.

[7] K. Thuro, J. Singer, H. Kasling, and M. Bauer, “Determining Abrasivity With The LCPC Test,” In 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, (2007).

[8] P. Drucker, “Validity of the LCPC abrasivity coefficient through the example of a recent Danube gravel/Aussagekraft des LCPC-Abrasivitätskoeffizienten am Beispiel eines rezenten Donauschotters,” *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 4, no. 6, pp. 681-691, 2011.

[9] H. Hashemnejad, M. Ghafoori, G. R. Lashkaripour, and S. T. Azali, “Effect of geological parameters on soil abrasivity using LCPC machine for predicting LAC,” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, no. 12, pp. 71-76, 2012.

[10] S. Kahraman, M. Fener, H. Käsling, and K. Thuro, “The influences of textural parameters of grains on the LCPC abrasivity of coarse-grained igneous rocks,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 58, pp. 216-223, 2016.

[11] J. Küpferle, A. Röttger, W. Theisen, and M. Alber, “The RUB tunneling device- A newly developed test method to analyze and determine the wear of excavation tools in soils,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 59, pp. 1-6, 2016.

[12] P. D. Jakobsen, M. T. Hamzaban, and N. Rish Sefid Mohammadi, “The effect of the particle size distribution curve on the abrasivity of non-cohesive soils in LCPC test,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 105, 2020.

[13] H. Lee, D. Kim, D. Shin, J. Oh, and H. Choi, “Effect of foam conditioning on performance of EPB shield tunnelling through laboratory excavation test,” *Transportation Geotechnics*, vol. 32, 2022.

[14] Z. Chen, A. Bezuijen, Y. Fang, K. Wang, and R. Deng, “Experimental study and field validation on soil clogging of EPB shields in completely decomposed granite,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 120, 2022.

[15] J. Küpferle, et al., “Influence of the slurry-stabilized tunnel face on shield TBM tool wear regarding the soil mechanical changes–Experimental evidence of changes in the tribological system,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 74, pp. 206-216, 2018.

[16] J. Düllmann, *Ingenieurgeologische untersuchungen zur optimierung von Leistungs-und verschleißprognosen bei hydroschildvortrieben im lockergestein*. Ruhr-Universität Bochum, 2014.

[17] G. Barzegari, and A. Uromeihy, “Evaluation of soil abrasiveness in mechanized tunneling with special attitude to the Tabriz metro line1,” *Engineering Geology*, vol. 5, no. 1, pp. 41-58, 2012, (In Persian).

[18] B. M. Das, and K. Sobhan, Eds., *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, 2017.

[19] W. B. Fuller, and S. E., Thompson, “The laws of proportioning concrete,” *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 59, no. 2, pp. 67-143, 1907.

[20] A. N. Talbot, H. A. Brown, and F. E. Richart, “The strength of concrete: its relation to the cement aggregates and water,” University of Illinois, no. 137-138, 1923.

[21] B. Martineau, “Formulation of a general gradation curve and its transformation to equivalent sigmoid form to represent grain size distribution,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, no. 1, pp. 199-207, 2017.

[22] AFNOR P18-579, *Aggregates. Abrasiveness and grindability test /Essai d’ abrasivite’ et de broyabilite*. Association Francaise de Normalisation, 1990.

[23] E. A. Gharahbagh, J. Rostami, and A. Palomino, “New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 26, no. 5, pp. 604-613, 2011.

[24] ASTM D422-63, *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International, West Conshohocken: PA, 2007.